

# Méthodologie de caractérisation des variétés et proposition de conduites culturales adaptées à une agriculture durable

Marie-Hélène JEUFRROY<sup>1</sup>, Christine BOUCHARD<sup>1</sup>, Marianne CERF<sup>2</sup>, Arnaud GAUFFRETEAU<sup>1</sup>, Christophe LECOMTE<sup>3</sup>, Chantal LOYCE<sup>1</sup>, Lorène PROST<sup>1</sup>, Marie-Hélène BERNICOT<sup>4</sup>, Jean-Bruno BEAUFUMÉ<sup>8</sup>, Sébastien CUVELIER<sup>6</sup>, Thierry DEMARQUET<sup>5</sup>, Daniel DOBROC<sup>6</sup>, Philippe DU CHEYRON<sup>4</sup>, Alain LAROCHE<sup>7</sup>, Olivier LEBLANC<sup>7</sup>, Philippe LONNET<sup>5</sup>, Eric MARGALÉ<sup>6</sup>, Marcel MEAUSOONE<sup>6</sup>, Jean-Patrick MONNIER<sup>6</sup>, Carine ROUSSILLOT<sup>8</sup>, Patrice SENNELARD<sup>7</sup>, Gilles STAGNARO<sup>8</sup>, Jérôme VAN SUYT<sup>5</sup>, Dominique VERGER<sup>6</sup>, Axel OLIVIER<sup>9</sup>,

**Coordinateur :** Axel OLIVIER, aolivier@invivo-group.com, Tél. : 01 40 66 20 78

1 - UMR Agronomie - INRA AgroParisTech, 78850 Thiverval-Grignon

2 - UMR SAD-APT - INRA AgroParisTech, 78850 Thiverval-Grignon

3 - INRA UMRLEG, INRA-ENESAD - 17 rue Sully, BP 86510, 21065 Dijon Cedex

4 - ARVALIS - Institut du végétal - La Minière, 78280 Guyancourt

5 - Florimond Desprez - 3 rue Florimond Desprez, BP 41, 59242 Cappelle en Pévèle

6 - Serasem - 10-12 rue Roger Leclercq, 59840 Prémesses

7 - C.C.Benoist - Ferme de Moyencourt, 78910 Orgerus

8 - Limagrain Verneuil Holding - Ferme de l'Étang, BP 3, 77390 Verneuil L'étang

9 - GIE Club 5 - 83 avenue de la Grande Armée, 75782 Paris Cedex 16

Les conduites culturales répondant aux exigences d'une agriculture durable respectueuse de l'environnement reposent sur une utilisation réduite des intrants et sont donc caractérisées par une occurrence élevée de facteurs limitants variés (Loyce *et al.*, 2008). Ces facteurs limitants sont principalement l'azote (réduction de la fertilisation azotée), les maladies (réduction de la protection fongicide), mais aussi, comme dans des conduites plus classiques, l'eau et le climat (rayonnement et température). Partant de ce constat, certains sélectionneurs de blé ont engagé un processus de sélection de variétés susceptibles de tolérer ces facteurs limitants du milieu, c'est-à-dire dont la production (rendement et qualité) en situation limitante sera proche de celle en conduite intensive. Le Catalogue français s'enrichit régulièrement de variétés de blé qui cumulent productivité et résistance aux maladies (Lonnet, 1997). Ces variétés permettraient de réaliser des économies de fongicides et de répondre ainsi aux attentes des consommateurs vis-à-vis des modes de production respectueux de l'environnement. Cette éclosion d'un nouveau type variétal est le résultat d'efforts de longue haleine, de stratégies de sélection conçues sur le long terme et d'une politique volontariste du CTPS qui dote d'un bonus les variétés tolérantes aux maladies pour favoriser leur inscription (Mistou, 2001).

Parallèlement, la mise au point d'itinéraires techniques à bas niveaux d'intrants a beaucoup progressé. Plusieurs travaux ont clairement montré qu'un recours moindre aux traitements fongicides était d'autant moins risqué que l'on réduisait simultanément l'alimentation azotée précoce et la densité de plantes, facteurs favorisant le développement des maladies comme le piétin-verse, la septoriose et l'oïdium (Saulas et Meynard, 1998; Loyce *et al.*, 2008). Ces réductions de la fertilisation azotée et de la densité de semis concourent également à l'économie d'intrants et contribuent à renforcer la résistance à la verse des peuplements. Meynard (1985 ; 1991) a ainsi défini des réductions équilibrées des différents intrants en fonction de l'objectif de rendement en utilisant des modèles agronomiques simples.

Cependant, ces variétés restent encore peu cultivées, bien que leur intérêt économique ait été clairement démontré dans un contexte de prix du blé faible à moyen (Loyce *et al.*, 2001; Félix *et al.*, 2002). Aussi, nous proposons de contribuer au développement de ces variétés par une meilleure connaissance de leurs caractéristiques, associée à un choix adéquat de conduite de culture, l'ensemble contribuant à une agriculture durable au plan économique et environnemental.

Dans ce contexte, la sélection de variétés nécessite : (1) de disposer de variétés bien adaptées à des conduites caractérisées par une réduction de l'utilisation des intrants (azote, pesticides en particulier, eau éventuellement), mais aussi (2) d'être capable de proposer des conduites à bas niveau d'intrants adaptées aux caractéristiques variétales, pour assurer une rentabilité économique au producteur, condition expresse pour que ces variétés soient cultivées. L'adoption de ces variétés est donc très contingente de notre capacité à identifier des couples variété x itinéraire technique ayant un intérêt économique et environnemental. Il a en effet été clairement démontré que les intérêts environnementaux des variétés sont étroitement liés aux itinéraires techniques qui leur sont appliqués et aux systèmes de culture dans lesquels elles sont insérées (Fargue, 2002). La sélection de variétés multirésistantes et productives, bien adaptées aux conduites culturales à bas niveau d'intrants existe depuis plusieurs années. Mais il est souvent difficile, alors que les variétés sont prêtes à être inscrites, d'identifier, dans la liste des variétés effectivement inscrites, celles qui sont adaptées à ces conduites et, surtout, d'identifier les caractéristiques propres de chaque variété qui pourraient être valorisées dans une conduite à bas niveau d'intrants : les notes de résistance variétale aux maladies donnent une indication partielle sur les réductions de fongicides possibles, mais insuffisante, et d'autres caractéristiques ne sont pas connues (tolérance à des réductions de densités de semis ou de fertilisation azotée, tolérance au stress hydrique, etc.). Or, pour réussir la conduite culturale d'une variété, il est nécessaire de l'adapter aux caractéristiques de cette variété, afin de valoriser au mieux l'ensemble de ses atouts.

De plus, il apparaît nécessaire de vérifier la faisabilité et les limites d'une expérimentation visant à comparer le comportement de variétés dans des conduites à bas niveau d'intrants. Dans ces essais, un même itinéraire technique est appliqué à l'ensemble des lignées en comparaison dans l'essai, alors que celles-ci couvrent souvent une gamme très large de précocité. Or, les différences de précocité jouent de manière importante sur la réponse des variétés aux techniques. Ainsi, par exemple, selon la position du dernier apport d'azote par rapport à la floraison, les lignées les plus précoces et les lignées les plus tardives auront des réponses différentes en terme de rendement et surtout de teneur en protéines, que l'on pourrait attribuer à tort à une caractéristique variétale. Par ailleurs, un traitement fongicide unique pourra être bien positionné pour certaines variétés et mal pour d'autres, ce qui

peut les désavantager. Les différences de précocité jouent également sur l'effet attendu de certains facteurs limitants observés (comme, par exemple, une note de maladie, observée à une date identique pour toutes les lignées).

Pour accroître la fiabilité du tri effectué lors du processus de sélection, et en particulier dans les dernières étapes de ce processus, et en augmentant la rapidité, en particulier en réduisant les coûts inhérents à la mise en œuvre des expérimentations au champ, il nous semble donc indispensable d'accroître notre connaissance des caractéristiques propres de chaque variété pouvant être valorisées par les conduites culturales à bas niveau d'intrants, et de proposer une méthode permettant d'adapter rapidement l'itinéraire technique à ces caractéristiques variétales.

L'objectif de cette étude est de proposer des méthodes pour caractériser et prédire le comportement des variétés de blé pour des conduites de culture et des milieux variés.

## 1. Connaître les variétés dans leur réponse aux facteurs limitants du milieu

### ► DIAGVAR : un outil pour caractériser les variétés dans leur réponse aux facteurs limitants du milieu

#### Présentation de la méthode et de l'outil

L'outil DIAGVAR, conçu à partir de la méthode mise au point par Lecomte (2005), est structuré en trois parties. Il est alimenté par des fichiers d'entrée dont le format est standardisé : par essai (lieu\*année\*conduite), on doit disposer d'un fichier "météo" contenant les données du 1<sup>er</sup> août de l'année d'implantation jusqu'à la date de récolte, et d'un fichier "récolte" qui contient les données de rendement, de stades, de notations sur les variétés présentes dans les essais.

La première partie consiste à préparer les données d'entrée qui vont être utilisées. L'outil va chercher les données contenues dans les couples de fichiers "météo" et "récolte" qui alimentent les calculs. Il transforme un certain nombre d'observations réalisées sur les variétés en indicateurs caractéristiques des différents facteurs limitants existants, tous sur une même échelle.

La deuxième partie réalise le diagnostic agronomique des facteurs limitants dans chaque milieu du réseau, et la quantification de leurs effets sur le rendement. Ce diagnostic se fait à partir d'observations sur un nombre limité de variétés appelées génotypes révélateurs. Il est basé sur une régression linéaire multiple qui vise à expliquer l' "écart du rendement observé au rendement potentiel", le rendement potentiel correspondant au rendement maximal que peut atteindre la variété quels que soient le lieu et la conduite : c'est une donnée que l'on possède a priori. Les variables explicatives sont les indicateurs des facteurs limitants calculés dans la première phase de la démarche. Cette étape du diagnostic est effectuée pour chacun des génotypes révélateurs.

La troisième partie permet de caractériser la résistance de toutes les variétés présentes dans le réseau à ces facteurs limitants. On s'intéresse donc, dans cette étape, à toutes les variétés du réseau et plus seulement aux témoins révélateurs utilisés pour le diagnostic agronomique. Dans cette phase, on utilise une régression factorielle pour décomposer l'interaction génotype\*milieu. Les variables explicatives de cette régression sont les facteurs limitants mis en évidence dans l'étape précédente.

L'outil a, pour résumer, trois objectifs :

- identifier les facteurs limitants présents dans chaque milieu d'un réseau d'essais,
- quantifier la contribution de chaque facteur limitant aux pertes de rendement observées, dans chaque milieu et pour chaque génotype révélateur,
- quantifier la résistance de chaque génotype testé vis-à-vis des facteurs limitants identifiés.

DIAGVAR est donc un outil de caractérisation des milieux et des génotypes.

#### Conception en interaction avec les utilisateurs

Le travail réalisé avec les partenaires du projet autour de l'outil DIAGVAR a consisté en quatre phases : une première phase de découverte des attentes des utilisateurs, de familiarisation avec leurs problématiques et de mise au point du prototype, une deuxième phase de test du prototype par les utilisateurs en utilisant les données produites dans un réseau expérimental des partenaires du projet, une troisième phase de retour entre concepteurs sur l'outil DIAGVAR pour tenir compte des remarques des utilisateurs, puis une quatrième phase de retour vers les utilisateurs pour récolter les impressions des partenaires quant à la méthodologie mise en place dans cette action (Prost, 2008).

Ces quatre phases nous ont permis d'arriver à la mise au point d'un prototype opérationnel de caractérisation des milieux et des variétés d'un réseau, d'initier l'utilisation de ce prototype et d'en retirer des pistes pour améliorer le logiciel et la méthode. Nous avons également choisi de nous focaliser sur les deux premières parties de l'outil (mise au point des indicateurs et diagnostic agronomique) au détriment de la partie "caractérisation des variétés" qui paraissait moins directement opérationnelle.

### ► Test de DIAGVAR sur les essais FSOV 2004-2006

#### Les essais

Le tableau 1 décrit les essais spécifiques réalisés dans le cadre du projet. Les dispositifs expérimentaux sont les dispositifs habituels des stations expérimentales retenues. Les essais présentent en général deux conduites : une conduite "intensive" (int) et une autre conduite, non traitée aux fongicides (nt) ou "bas niveau d'intrants" (ext), c'est-à-dire avec une réduction de la densité, de la fertilisation azotée et des régulateurs de croissance.

Des listes variétales différentes ont été utilisées sur les trois années expérimentales mais avec des témoins quasiment constants : "SOISSONS" et "CHARGER" sur les trois années, "CAPHORN" en 2004/2005 et 2005/2006.

Années	INRA	GIE C5	ARVALIS
2003/2004	Dijon (int et ext) Rennes (int et ext)	Brosse Montceaux (int et ext) Cappelle (int et ext) Houville (int et ext) Orgéus (int et ext) Prêmesques (int et ext) Verneuil (int et nt)	Etoile (int et ext) Lhuitre (int et nt) Ouzouer (int et ext)
2004/2005	Dijon (int et nt) Rennes (int et fi)	Brosse Montceaux (int et ext) Cappelle (int et ext) Houville (int et ext) Orgéus (int et ext) date de semis n°1 Orgéus (int et ext) date de semis n°2 Prêmesques (int et ext) Verneuil (int et nt)	Bouy (int) Ouzouer (int et nt)
2005/2006	Rennes ITK1 et ITK4	Cappelle ITK2 et ITK3 Orgéus T et NT Prêmesques ext et int Verneuil T Brosse Montceaux int et ext	

Tableau 1 : Localisation des essais et nature des essais

### Diagnostic des facteurs limitants dans les essais

Le résultat du diagnostic sur les trois témoins ("SOISSONS", "CHARGER", "CAPHORN") donne des  $R^2$  (coefficient de corrélation entre les pertes de rendement observées et les pertes estimées par le modèle de régression multiple) variant entre 43 % pour "SOISSONS" et 66 % pour "CAPHORN". Quinze facteurs limitants du rendement ont été identifiés dans les essais FSOV 2004/2006 : la carence azotée pendant la phase végétative, la rouille jaune pendant le remplissage des grains, la septoriose sur feuilles à montaison, le nombre de plantes par  $m^2$ , les températures froides hivernales, la sécheresse autour du stade "épi1cm", les températures élevées entre les stades "épi1cm" et "floraison", les températures froides dans le mois précédant la floraison (et entre les stades "méiose" et "floraison"), le rayonnement dans le mois précédant la floraison (et entre les stades "méiose" et "floraison"), les températures élevées et la sécheresse entre les stades "laiteux" et "maturité". Ces résultats ont été en grande partie confirmés par l'expertise des partenaires sur leurs lieux d'essais.

### Estimation de la résistance des variétés aux facteurs limitants caractérisés

Sur les 17 variétés communes à l'ensemble des milieux expérimentaux testés, six notes de résistance ont été sélectionnées et ont pu être estimées par l'outil à partir des quinze facteurs limitants dont le diagnostic avait démontré un effet significatif sur le rendement. La note de résistance de chaque variété est caractérisée par sa valeur moyenne et un écart-type. L'outil propose un classement relatif des notes, de manière à couvrir, parmi les variétés testées, la gamme de 1 à 9.

#### ► Recherche d'un indicateur de nutrition azotée fiable et facile d'accès

Dans l'outil DIAGVAR, le diagnostic de carence azotée pendant la montaison est réalisé au moyen d'une mesure de l'indice de nutrition azotée (INN) à floraison. Or cette mesure d'INN n'est pas adaptée aux pratiques des acteurs : c'est une mesure lourde, destructive et coûteuse qui nécessite de la main d'œuvre, déjà trop rare. De plus, elle requiert des expérimentateurs qu'ils passent dans leurs essais à floraison alors que les expérimentateurs d'essais variétaux passent généralement uniquement à épiaison. Nous avons donc cherché un indicateur mieux adapté aux pratiques des acteurs, mais tout aussi performant, en nous intéressant aux mesures fournies par un chlorophyll meter (SPAD 502 Minolta).

### Étude de la relation SPAD/INN

La première étape du travail a consisté à préciser le mode d'emploi du SPAD. Nous avons montré que les mesures réalisées sur les deux dernières feuilles de la tige sont étroitement corrélées, ce qui permet de recommander la mesure sur une seule de ces deux feuilles, la F2, *a priori* plus sensible aux variations de nutrition azotée.

Dans une seconde étape, à partir d'une base de données ancienne comportant 14 variétés, cinq modalités de fertilisation azotée et trois années, nous avons montré qu'il existait une relation exponentielle étroite ( $r^2=0.796$ ) entre les mesures SPAD et l'indice de nutrition azotée mesuré sur la culture. Cette relation comportant de forts effets "année" et "variété", nous avons exploré la relation entre l'INN et l'index SPAD, ce dernier étant le ratio entre la valeur SPAD d'une variété et la valeur SPAD de la même variété sur une modalité bien alimentée en azote. Cette relation est meilleure ( $r^2=0.892$ ) ; elle permet d'éliminer l'effet variété, mais conserve un effet année. Néanmoins, la qualité prédictive de cette relation est très satisfaisante (RMSEP=0.093).

### Évolution de la mesure SPAD autour de floraison

Pour intégrer cet indicateur dans les routines expérimentales des acteurs, celui-ci doit pouvoir être mesuré à l'occasion des visites réalisées habituellement par les expérimentateurs dans leurs essais, et notamment au moment de l'épiaison des variétés. Nous avons donc cherché à déterminer comment les mesures de SPAD évoluaient dans le temps pendant la période autour d'épiaison-floraison. Sur deux essais à Grignon, nous avons donc suivi le SPAD chaque jour pendant trois semaines autour de la floraison, sur trois variétés de précocité très contrastée et deux itinéraires techniques différant par les dates d'apport d'azote. À partir de ce suivi, nous avons déterminé la plage de temps autour de la floraison pendant laquelle les mesures SPAD étaient stables et non différentes de la valeur observée à floraison. Cette période s'étale de neuf jours avant floraison à quatre jours après floraison, ce qui laisse une souplesse aux expérimentateurs pour mesurer cet indicateur en même temps que le repérage des épiaisons, sur l'ensemble des variétés testées dans les essais.

## 2. Prendre en compte la précocité variétale dans la conduite des essais : conséquences pour l'évaluation des variétés

Les évaluations des caractéristiques variétales du blé tendre, sur lesquelles sont fondés les choix variétaux des agriculteurs, sont obtenues le plus souvent dans des essais en conduite intensive (azote non limitant, emploi systématique de régulateur de croissance, application de fongicides assurant une protection totale, etc.) ou combinant conduite intensive et absence de traitement phytosanitaire. De plus, ces essais de comparaison variétale comportent un grand nombre de variétés, couvrant généralement une gamme étendue de précocité. Or, les techniques culturales appliquées sur les essais le sont à une date unique et souvent au stade des variétés les plus précoces. Ces interventions seraient donc plus favorables pour certaines variétés que pour d'autres, selon leur stade de développement lors de l'application. La précocité variétale est ainsi rarement prise en compte dans la mise au point des protocoles expérimentaux et dans l'analyse des résultats obtenus. Or, cultivées dans des conditions moins intensives, les variétés peuvent rencontrer des facteurs limitants variés, de nature diverse, qui peuvent alors modifier sensiblement leurs performances (et en particulier l'effet de la précocité variétale sur ces performances qui peut être plus marqué).

Dans ce cadre, nous avons mis en place une expérimentation qui vise à quantifier les erreurs liées à la non prise en compte de la précocité des variétés dans la conduite de la culture (variant selon les dates des interventions techniques, calées sur les stades des variétés précoces ou tardives) sur différentes variables (notes de maladies, rendement, teneur en protéines des grains).

#### ► Le dispositif expérimental

L'expérimentation a été mise en place en 2004/2005 et 2005/2006 sur le site expérimental de l'INRA de Grignon (78) dans un sol limoneux (environ 60 % de limon) et derrière un maïs grain. Chaque année, les combinaisons de choix variétal et de date d'intervention ont été testées sur deux itinéraires techniques (ITK). L'ITK2 correspond aux recommandations locales des organismes de conseil tandis que l'ITK4 est caractérisé par un niveau d'intrants réduit (réduction de la densité de semis de 40 %, pas de régulateur ni de traitement fongicide, réduction de la dose d'azote de 60 kg/ha).

Les deux facteurs étudiés sont répartis sur un dispositif en split-plot avec trois répétitions. Dix variétés ont été

retenues de manière à couvrir une large gamme de précocité allant des plus précoces (note de précocité à épiaison du "GEVES" de 8), aux plus tardives (note de 4.5). Ces variétés présentent également des niveaux variés de résistance à la septoriose et à la rouille brune. Deux dates d'intervention (ou conduites) ont été appliquées pour chaque variété et sur les deux itinéraires techniques. Les dates d'interventions sont calées sur les stades des variétés les plus précoces, pour la conduite P, et des variétés les plus tardives pour la conduite T. Ces décalages dans les dates d'application concernent les second et troisième apports d'azote et l'application du régulateur de croissance.

Sur les plantes, nous avons réalisé un suivi des stades ("épi 1 cm", gonflement, épiaison et floraison), une mesure des composantes du rendement et du rendement, des mesures de biomasse et de teneur en azote à la sortie de l'hiver, à floraison et à maturité physiologique pour estimer en particulier l'Indice de Nutrition Azotée (INN) à floraison et la teneur en protéines des grains, des notations de maladies et de verse.

## ► Résultats

**Rythmes de développement et état du peuplement végétal**  
L'écart entre l'apparition du stade épiaison de la variété la plus précoce (Trocadéro) et celui de la plus tardive (Vivant) est de 20 jours en 2004/2005 et de 14 jours en 2005/2006. Cette gamme de précocité correspond à celle généralement observée dans les essais variétaux. Le classement issu des dates d'épiaison obtenues sur l'essai n'est pas strictement identique à celui issu des notes de précocité à épiaison du GEVES, mais la tendance est respectée.

Sur l'indice de nutrition azotée (INN) à floraison, nous constatons un effet de la conduite à l'avantage de la modalité P en 2004/2005 pour les deux ITK, dû à une moins bonne valorisation du deuxième apport d'engrais N sur la conduite T, à cause de conditions climatiques défavorables (Tableau 2). En 2005/2006, la différence de valeurs d'INN entre les deux conduites est moins forte et n'est présente qu'en ITK4. Ainsi, dans un contexte d'itinéraire technique à bas niveau d'intrants (ITK4), un décalage de date d'intervention peut avoir une incidence plus marquée sur la culture.

Campagne	ITK2		ITK4	
	P	T	P	T
2004/2005	0.88	0.73	0.80	0.68
2005/2006	0.87	0.88	0.75	0.69

Tableau 2 : Valeurs moyennes d'INN à floraison sur l'ensemble des variétés.

Les maladies rencontrées sur les essais sont la septoriose et la rouille brune. Bien qu'en 2004/2005, la pression parasitaire ait été tardive, nous avons constaté des attaques assez fortes, principalement de septoriose. En 2005/2006, aucune attaque

sérieuse n'a été observée. Enfin, comme attendu, les attaques ont été beaucoup plus faibles (inférieures en moyenne à 10 %) en ITK2 du fait de la protection fongicide. A même date de mesure, le classement des attaques sur les variétés est cohérent avec les notes de résistance. Une analyse statistique a permis de montrer que les attaques étaient significativement plus fortes en date d'intervention P (précoce).

### Influence de la conduite sur le classement des variétés pour le rendement

La perte moyenne de rendement est de 11 q/ha entre l'ITK4 et l'ITK2, ce qui est cohérent avec la réduction des intrants entre ces deux ITK, bien qu'inférieur à la différence d'objectif de rendement attendue (de l'ordre de 20 q/ha). L'analyse de variance effectuée pour l'ITK4 en 2004/2005 indique une interaction entre les facteurs "date d'intervention" et "variété" ( $p=0.002$ ). Ainsi, le décalage des dates d'intervention influe sur le classement variétal. Bien que les dates d'intervention calées sur la variété précoce (P) favorisent le rendement pour la plupart des variétés, on constate que deux variétés (Isengrain et Récital) ont eu des rendements sensiblement supérieurs lorsque les interventions étaient calées sur les variétés tardives (Figure 1). Aucune interaction n'est observée en ITK2 ( $p=0.34$ ), ainsi qu'en 2005/2006.

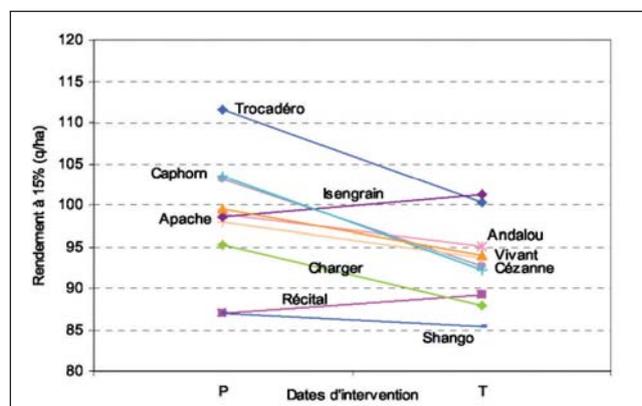


Figure 1 : Classement des variétés vis-à-vis du rendement selon les dates d'intervention en ITK4 en 2004/2005.

### Influence de la conduite sur le classement des variétés pour la teneur en protéines

Concernant la teneur en protéines, l'interaction entre l'effet de la date d'intervention et de la variété est significative en 2004/2005 et 2005/2006 et ce pour les deux itinéraires techniques ( $p=0.01$  pour ITK2 en 2004/2005 et  $p<0.0001$  par ailleurs). En date d'intervention P, Trocadéro, variété précoce, présente (en ITK4 pour les deux campagnes et en ITK2 en 2005/2006) une teneur en protéines supérieure à Vivant, variété tardive (Figure 2). Or, en date

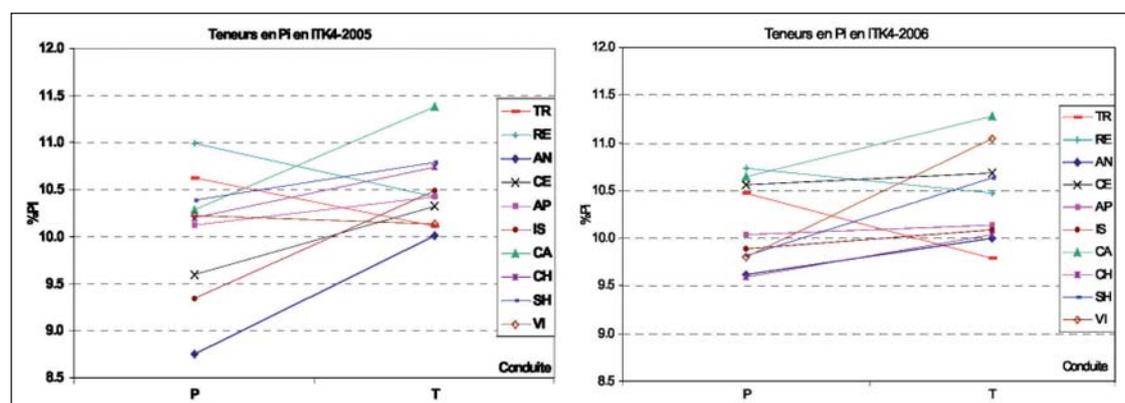


Figure 2 : Classement des variétés vis-à-vis de la teneur en protéines selon les dates d'intervention en ITK4.

d'intervention tardive (T), Vivant a une teneur en protéines supérieure à celle de Trocadéro. On peut faire le même constat entre Cézanne (précoce) et Shango (tardive) en ITK4. Enfin, si l'on compare les deux ITK (en 2004/2005), on constate que les écarts de teneurs en protéines entre les deux conduites P et T sont plus importants en ITK4.

### 3. Évaluer l'adaptation des variétés à des conduites à bas niveaux d'intrants

Cette dernière partie vise à évaluer la capacité du modèle Beta-var à prédire le comportement de variétés dans une conduite à niveau d'intrants réduit à partir de résultats expérimentaux obtenus sur les mêmes variétés mais conduites selon des itinéraires techniques (ITK) plus conventionnels (de type intensif-raisonné). Il s'agit donc d'apprécier s'il est pertinent d'utiliser le modèle Beta-var pour :

- limiter le coût expérimental en réduisant le nombre d'ITK testés,
- accroître la valorisation des essais réalisés aujourd'hui sur les variétés en offrant une prédiction convenable de leur comportement dans des situations différentes et plus prospectives.

#### ► Le modèle Beta-Var

Le modèle Beta-var (Loyce et al., 2002a et b ; Zhang, 2005) permet de simuler les conséquences sur le rendement, la teneur en protéines, la marge brute et le reliquat d'azote minéral dans le sol à la récolte, de différents ITK appliqués à différentes variétés de blé. Ce modèle non dynamique à vocation opérationnelle s'articule autour d'un nombre limité de relations organisées en quatre grands modules :

- un module "Semis", qui, à partir du rendement potentiel d'une variété donnée, estime la perte de rendement occasionnée par une densité de semis réduite,
- un module "Azote", qui estime les pertes de rendement liées à d'éventuelles carences azotées et calcule la teneur en protéines, qui dépend de la quantité d'azote absorbée et du rendement,
- un module "Maladie" qui, à partir des notes de résistance variétale aux maladies aériennes, et de la pression de chaque maladie, estime une perte de rendement liée aux maladies (Zhang et al, 2007),
- un module "Economique", qui sert au calcul de marge (non utilisé dans cette étude).

#### ► Les données utilisées

Les essais que nous utilisons dans cette étude ont été réalisés en 2005-2006 sur quatre lieux, à Cappelle (59), Orgéus (78), Prêmesques (59) et Rennes (35). Sur chacun de ces lieux, 21 variétés, dont les notes de résistances aux maladies et les précocités ont été renseignées par le "GEVES", ont été conduites selon deux itinéraires techniques. L'ITK2 correspond aux recommandations locales, définies selon un objectif de rendement, et l'ITK3 a été établi selon un objectif de réduction raisonnée des intrants (semences, azote, fongicide et régulateur de croissance). La réduction de la dose totale d'azote entre les deux ITK a été systématiquement appliquée sur le deuxième apport. De plus, généralement, aucun traitement fongicide n'a été effectué sur la conduite extensive sauf à Cappelle où un traitement a été réalisé. Deux répétitions ont été réalisées pour chaque couple variété-itinéraire technique.

Pour chaque essai, les informations nécessaires au modèle ont été fournies par les expérimentateurs : densité de semis, bilan azoté en sortie d'hiver, date et dose des apports d'azote, niveau d'attaque des principales maladies (rouille brune, rouille jaune, oïdium et septoriose) sur une échelle discrète allant de 1 à 9, fongicides appliqués (matière active et dose), rendements et teneurs en protéines des grains mesurés à la récolte.

#### ► Méthodes d'évaluation de la qualité prédictive et décisionnelle du modèle

Dans un premier temps, nous avons évalué la capacité du modèle à prédire correctement des rendements et teneurs en protéines en conduite extensive. A cette fin, les sorties du modèle ont été comparées aux résultats obtenus en expérimentation. Nous avons également cherché à savoir si l'intégration d'un effet variétal dans le module maladie de Beta-var améliore significativement la qualité de ses prédictions de rendement. Pour ce faire, nous avons comparé la qualité des prédictions fournies par ce modèle avec celle offerte par un modèle (dit moyen) n'intégrant aucun effet variétal et associant à l'ensemble des variétés une perte de rendement moyenne identique (Colson et al., 1995; Husson et al., 1997). Cette perte de rendement a été estimée en moyennant les pertes observées entre l'ITK2 et l'ITK3 sur l'ensemble des variétés cultivées sur chaque lieu d'étude.

Cette analyse a été complétée par l'examen de la qualité décisionnelle du modèle, c'est-à-dire sa capacité à répondre aux attentes des sélectionneurs. Nous avons considéré que l'objectif des sélectionneurs était d'identifier, parmi les 21 variétés conduites dans les différents lieux d'essai, les  $n$  plus productives en ITK3 à partir des rendements obtenus pour ces mêmes variétés en ITK2. Pour juger de la capacité du modèle à répondre à cet objectif, nous avons défini les deux indicateurs suivants :

- nombre de variétés parmi les  $n$  meilleures en ITK3 (dans l'expérimentation) correctement identifiées par le modèle à partir des résultats obtenus en ITK2,
- perte moyenne de rendement occasionnée par l'utilisation du modèle et de résultats obtenus en ITK2 pour choisir les  $n$  meilleurs variétés en ITK3\*. Concrètement, il s'agit de la différence entre la moyenne des rendements en ITK3 des  $n$  variétés les plus productives selon l'expérimentation et la moyenne des rendements en ITK3 des  $n$  variétés les plus productives selon le modèle.

Pour évaluer la plus-value décisionnelle du modèle, nous avons comparé la valeur de ces indicateurs avec la valeur des mêmes indicateurs obtenue en utilisant seulement les résultats observés en ITK2 (sans utiliser le modèle) pour choisir les  $n$  variétés les plus productives en ITK3. Se baser sur les résultats obtenus en ITK2 pour choisir les meilleures variétés en ITK3 revient à penser que les variétés les plus productives en ITK2 le sont aussi en ITK3.

Ces indicateurs ont été calculés à l'échelle de l'essai et du réseau d'essais (constitué ici de quatre essais).

\* Soit  $PM$  la perte moyenne de rendement occasionnée par l'utilisation du modèle et de résultats obtenus en ITK2 pour choisir les  $n$  meilleurs variétés en ITK3

Soit  $RdtITK3i$  le rendement obtenu par la variété  $i$  en ITK3

Soit  $nVarMod$  les  $n$  variétés sélectionnées en utilisant le modèle  
Soit  $nVarExp$  les  $n$  variétés les plus productives en ITK3

Alors :

$$PM = \frac{1}{n} * \left( \sum_{i \in nVarExp} RdtITK3i \right) - \frac{1}{n} * \left( \sum_{i \in nVarMod} RdtITK3i \right)$$

## ► Résultats

La baisse de rendement entre ITK2 et ITK3 est systématique dans l'ensemble des sites et des variétés, mais elle est très variable selon le lieu (26 q/ha à Rennes, 22 q/ha à Prémesses, 14 q/ha à Orgerus, 9 q/ha à Cappel), en lien avec les conditions pédoclimatiques et des différences dans les ITK appliqués. En moyenne sur l'ensemble des lieux, les pertes relatives de rendement varient en fonction des variétés, de 11.17 % (Koréli) à 24.35 % (Orvantis).

Le modèle utilisant en entrée des observations réalisées sur l'ITK2, prédit mal la teneur en protéines des grains (RMSEP de 0.97 %). En revanche, il a une assez bonne qualité prédictive pour le rendement. En effet, la RMSEP du modèle Betha-var est plus faible que celle obtenue en utilisant une perte de rendement moyenne par lieu (RMSEP = 4.72 q/ha et 5.44 q/ha respectivement) : l'intégration du facteur variétal dans le module maladie du modèle Betha-var semble donc avoir un effet bénéfique sur la qualité des prédictions du modèle. Une analyse plus fine des résultats montre que la prédiction des pertes de rendement entre les deux ITK n'est bien prédite par Betha-var que dans les situations où la pression de maladie est importante. Ce constat s'explique facilement par le fait que la variété n'est actuellement prise en compte dans le modèle qu'au sein du module "Maladie".

Enfin, il apparaît sur les figures 3 et 4 présentant les résultats obtenus à l'échelle du réseau d'essai qu'une utilisation du modèle Bétha-var à partir des résultats obtenus en ITK2 apporte une plus-value décisionnelle significative. D'après la figure 3, le modèle (associé aux résultats obtenus en ITK2) est mieux à même d'identifier les variétés les plus productives en ITK3 que l'utilisation directe des mesures issues de l'ITK2. En effet, le nombre de variétés correctement identifiées est toujours supérieur si nous utilisons le modèle plutôt que les seuls résultats obtenus en ITK2, le modèle permettant d'identifier 8 des 10 variétés les plus productives en ITK3 quand les résultats issus de l'ITK2 ne permettent d'en identifier que 6. De plus, la figure 4 montre que les pertes de rendement associées aux erreurs de choix variétal sont au moins deux fois plus faibles si nous corrigeons les résultats obtenus en ITK2 par l'utilisation du modèle. Il faut cependant remarquer que ces résultats sont beaucoup moins tranchés à l'échelle plus petite de l'essai.

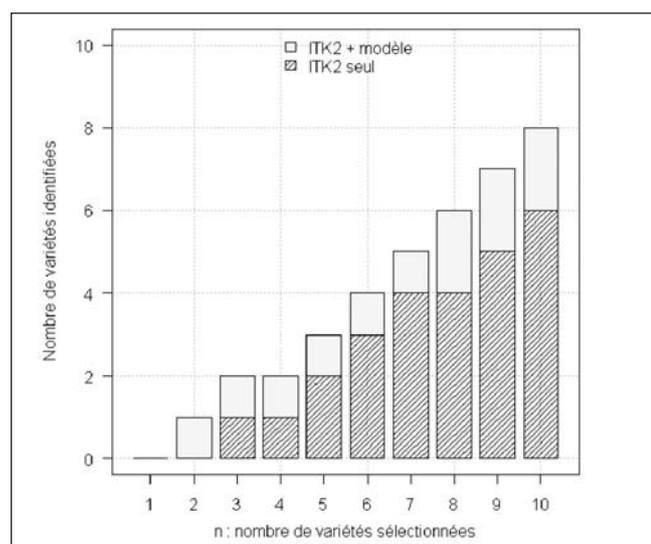


Figure 3 : Nombre de variétés, parmi les n meilleures en ITK3, correctement identifiées par une expérimentation en ITK2 associée ou non à l'utilisation du modèle Bétha-var.

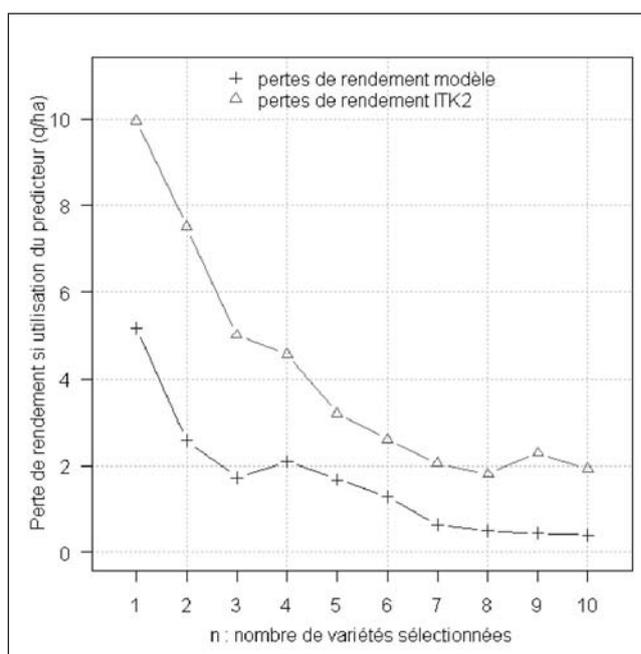


Figure 4 : Perte moyenne de rendement occasionnée par l'utilisation de résultats obtenus en ITK2 (corrigés ou non par le modèle Bétha-var) pour choisir les n meilleures variétés en ITK3.

## ► Conclusion-Perspective

Dans cette étude, nous avons mis au point un outil de caractérisation des milieux et d'évaluation des variétés, avec les acteurs impliqués dans l'évaluation variétale. Cet outil requiert encore quelques améliorations avant de pouvoir être utilisé en routine par les acteurs. Il pourrait par ailleurs être complété par des outils permettant de reconstituer l'historique de carences azotées, nécessaire pour correctement caractériser la réaction des variétés face à ce facteur limitant. Par ailleurs, cet outil pourrait également être appliqué au diagnostic de la teneur en protéines des grains chez le blé.

Nous avons montré que la gamme de précocité des variétés évaluées au sein d'un même essai pouvait entraîner des biais de classement des variétés, suite à une interaction forte entre la conduite appliquée de manière homogène sur l'essai et le stade de la variété. Les perturbations de ce classement semblent plus importantes en ce qui concerne la teneur en protéines qu'en ce qui concerne le rendement. Il serait donc nécessaire, dans l'avenir, de proposer des méthodes pour corriger les valeurs observées de teneur en protéines de ce biais.

Enfin, le modèle Betha-var apparaît comme un outil intéressant pour compléter les essais d'évaluation des variétés, réalisés dans une gamme réduite de conduites culturales pour des raisons de coût expérimental, en proposant une évaluation des variétés dans des conduites différentes, et en particulier dans des conduites à bas niveau d'intrants. L'évaluation de la qualité décisionnelle de ce modèle pourrait être poursuivie en identifiant les critères d'évaluation en relation directe avec l'activité de sélection.

## Références bibliographiques

- Colson J., Wallach D., Bouniols A., Denis J.B., Jones J.W.,** (1995). The mean squared error of yield prediction by Soygro. *Agronomy Journal* 87, 397-402.
- Fargue A.,** (2002). Maîtrise des flux de gènes chez le colza : Etude ex-ante de l'impact de différentes innovations variétales, Thèse de doctorat INA P-G, 168 p.
- Félix I., Loyce C., Bouchard C., Meynard J. M., Bernicot M. H., Rolland B., Haslé H.,** (2002). Associer des variétés rustiques à des niveaux d'intrants réduits : intérêts économiques et perspectives agronomiques. *Perspectives Agricoles* 279, 30-35.
- Lecomte C.,** (2005). L'évaluation expérimentale des innovations variétales. Proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype – milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences. Thèse de Docteur de l'INA P-G, pp.173.
- Husson, F., Wallach, D., Vandeputte, B.** (1997). Evaluation of CECOL, a model of winter rape. *European Journal of Agronomy*.
- Lonnet P.,** (1997). Les résistances variétales chez le blé. *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 83, 37-50.
- Loyce C., Bouchard C., Meynard J. M., Rolland B., Doussinault G., Bernicot M. H., Haslé H.,** (2001). Les variétés tolérantes aux maladies : une innovation majeure à valoriser par des itinéraires techniques économes. *Perspectives Agricoles* 268, 50-56.
- Loyce C., Rellier J.P., Meynard J.M.,** (2002a). Management planning for winter wheat with multiple objectives (1) : the BETHA system. *Agric. Syst.*, 72, 9-31.
- Loyce C., Rellier J.P., Meynard J.M.,** (2002b). Management planning for winter wheat with multiple objectives (2) : ethanol-wheat production. *Agric. Syst.*, 72, 33-57.
- Loyce C., Meynard J.M., Bouchard C., Rolland B., Lonnet P., Bataillon P., Bernicot M.H., Bonnefoy M., Charrier X., Debote B., Demarquet T., Duperrier B., Félix I., Heddadj D., Leblanc O., Leleu M., Mangin P., Méausoone M., Doussinault G.** (2008). Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop protection*.27, 1131-1142.
- Meynard J. M.,** (1985). "Construction d'itinéraires techniques pour la culture du blé d'hiver," Thèse. INA-PG, Paris.
- Meynard J.M.,** (1991). Pesticides et itinéraires techniques. In "Phytoprotective, Protection des plantes, Biopesticides" (P. Bye, C. Descoins and A. Deshayes, eds.), pp. 85-100. INRA, Paris.
- Mistou M.N.,** (2001). Appréciation de la résistance aux maladies des variétés de blé tendre d'hiver. Les essais du CTPS. *Perspectives Agricoles* 268, 46-49.
- Prost, L.** (2008). Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec de futurs utilisateurs : le cas de la modélisation des interactions génotype-environnement et de l'outil DIAGVAR. Thèse de Doctorat AgroParisTech, Paris (France), pp.198.
- Saulas P., Meynard J.M.,** (1998). Production intégrée et extensification sont-elles compatibles? Cas des céréales à paille. *Les dossiers de l'environnement de l'INRA* 16, 9-15.
- Zhang X.Y.,** (2005). Modélisation de la réponse des variétés de blé au niveau d'intensification. Influence de la pression de maladies foliaires. Thèse de Docteur de l'INA P-G, pp. 98.
- Zhang X.Y., Loyce C., Meynard J.M., Monod H.,** (2007). Modeling the effect of cultivar resistance on yield losses of winter wheat in natural multiple disease conditions. *European Journal of Agronomy*, 26, 384-393.